

Física por un tubo. Mide la velocidad del sonido en el aire y diviértete con los tubos sonoros

Ana Cros¹, Chantal Ferrer-Roca²

Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo, Universidad de Valencia, C/ Dr. Moliner 50, Burjassot, 46100 Valencia, España.

¹ Ana.Cros@uv.es

² chantal.ferrer@uv.es

[Recibido en marzo de 2010, aceptado en octubre de 2010]

En este trabajo damos las claves para diseñar un conjunto de tubos sonoros de PVC que permiten realizar una ejecución musical en grupo con la participación de un gran número de personas sin cultura musical previa. Proponemos además la utilización de los tubos para el estudio cuantitativo de los fenómenos físicos involucrados en la generación del sonido con instrumentos de viento. Se describe la utilización de los tubos sonoros, en combinación con un ordenador y un programa de análisis de sonido, para el análisis de ondas estacionarias y la determinación de la velocidad de propagación del sonido en el aire mediante distintos procedimientos.

Palabras clave: Acústica; Ondas estacionarias; Velocidad del sonido; Análisis de Fourier; Ciencia recreativa.

Physics in a tube. Measuring the speed of sound in air and having fun with sound tubes

In this paper we give the keys to designing a set of PVC pipes allowing for a musical performance with the participation of a large number of people with no previous musical experience. We also propose the use of tubes for the quantitative study of physical phenomena involved in sound generation with wind instruments. In combination with a computer and a sound analysis program, we study the formation of standing waves. The propagation velocity of sound in air is obtained using different procedures.

Keywords: Acoustics; Stationary waves; Velocity of sound; Fourier analysis; Recreational science.

Introducción

La música ofrece un punto de partida muy interesante y accesible para poner en contexto los conceptos de física que tienen relación con las ondas y la propagación de sonidos. En este trabajo nuestro objetivo es proponer una iniciativa que permite realizar una ejecución musical en grupo con la participación de un gran número de personas, utilizando tubos de PVC. Además, esta experiencia nos acerca de forma cuantitativa a los fenómenos físicos involucrados en la generación del sonido con instrumentos de viento, realizando una medida de la velocidad del sonido. Este proyecto puede ser desarrollado conjuntamente por el profesorado de física y de música e incluso con el de tecnología, si se procede a la construcción de los instrumentos en el mismo centro. De esta forma se potencia en los estudiantes un conocimiento integrado, más allá de la compartimentación a la que tiende generalmente la subdivisión del aprendizaje en asignaturas.

La física en la música: instrumentos musicales

A pesar de la ubicuidad de la música y de la existencia de una formación musical básica en la educación primaria y secundaria y algo más completa en los conservatorios y escuelas de música, el número de estudiantes y profesores que conocen la física básica implicada en el fenómeno sonoro es probablemente muy reducido. Como ya indicamos en una publicación

anterior (Ferrer-Roca y Cros 2005), la Física encuentra en la música uno de los mejores contextos para el estudio del movimiento oscilatorio y su propagación.

El origen de cualquier sonido son las vibraciones. Cualquier cuerpo que vibre se convierte en una fuente sonora y esa vibración, transmitida a través del medio, generalmente el aire, llega hasta el receptor que oye el sonido y lo procesa. Los instrumentos musicales están pensados para producir sonidos con una intensidad audible. Por ello, además de contar con algún mecanismo excitador que produzca el sonido, cuentan con una caja de resonancia que pone en vibración todo el aire que se encuentra en su interior. En los instrumentos de viento el mecanismo excitador que hace vibrar el aire puede ser la lengüeta (como en el oboe, el clarinete y el saxofón), los labios del músico (trompeta) o los remolinos que se forman al soplar o forzar la entrada de aire (órgano, flauta). Además, la forma del tubo selecciona y amplifica determinados armónicos a costa de otros, contribuyendo al timbre característico de cada instrumento.

El modelo físico más sencillo para representar un instrumento de viento es el modelo de tubo cilíndrico, especialmente idóneo para describir flautas, tubos de órgano, o los tubos sonoros que aquí nos ocupan. En el aire de un tubo cilíndrico se crea una onda acústica estacionaria cuya longitud de onda queda determinada por las características del tubo. El tubo puede ser abierto (o cerrado) por ambos extremos, o abierto por un extremo y cerrado por el otro. La vibración del aire en un tubo cilíndrico abierto por un extremo consta de un nodo en el extremo cerrado, en el que las moléculas de aire permanecerán quietas y un vientre en el extremo abierto donde el movimiento oscilatorio de las moléculas de aire tendrá amplitud máxima. En el esquema de la figura 1 se muestra el patrón de máximos y mínimos del movimiento de las moléculas de aire para los tres primeros armónicos de la onda estacionaria dentro del tubo. La frecuencia f_1 es la frecuencia más baja que puede escucharse en este tipo de tubo (armónico fundamental), y corresponde a la nota que se ejecuta.

La velocidad de propagación del sonido (v) se relaciona con su longitud de onda (λ) y su frecuencia (f) a través de la ecuación $f = v/\lambda$. Como en el modo fundamental el tubo, de longitud L , contiene un cuarto de longitud de onda, $\lambda = 4L$, la frecuencia fundamental viene dada por:

$$f_1 = \frac{v}{4L} . \quad (1)$$

Todos los instrumentos musicales cuyo cuerpo sea aproximadamente cilíndrico y se puedan considerar abiertos por un extremo y cerrados por el otro, producirán sonidos formados por esta frecuencia fundamental y todos los armónicos superiores múltiplos impares de esta frecuencia. Por supuesto, para cada longitud del tubo se tendrá una frecuencia fundamental y una serie de armónicos impares diferentes.

Es importante recordar que el tono de un sonido está relacionado con la frecuencia fundamental, mientras que las intensidades relativas de los armónicos contribuyen al timbre: la calidad del sonido, aquello que diferencia un mismo sonido producido por dos instrumentos diferentes. La referencia (García-Molina *et al.* 2009) presenta una revisión cuantitativa de los conceptos básicos sobre el sonido.

Los tubos sonoros o *palm pipes*

Los tubos sonoros son tubos cilíndricos abiertos por ambos lados que emiten sonido al ser percutidos con la palma de la mano en uno de sus extremos. Dado que al golpearlo obstruimos uno de los extremos del tubo, dejando el otro libre, las ondas estacionarias creadas

en su interior corresponden a las de un tubo cerrado por un extremo y abierto por el otro. Existen muchas versiones, incluso comerciales, de los tubos sonoros o palm pipes.¹ Desde el punto de vista de la física, se trata de una demostración incorporada al patrimonio docente común y es difícil saber quién la puso por primera vez en circulación. No obstante, nos gustaría recordar aquí una magnífica experiencia orquestal dirigida por J. S. Michlavzina a la que tuvimos ocasión de asistir con motivo de un congreso (Michlavzina 2004).

Para realizar una experiencia de contenido puramente físico, las longitudes de los tubos sonoros no tendrían por qué tener unos valores específicos. Pero si queremos que se trate también de una experiencia musical, es necesario que los tubos que fabriquemos tengan unas longitudes determinadas: aquellas que produzcan unas frecuencias fundamentales que coincidan con las de las notas de la escala musical.

El sistema de afinación o temperamento musical establece la relación de frecuencias entre las diferentes notas musicales disponibles, así como un valor absoluto de referencia. En la música occidental se utiliza actualmente la escala temperada con 12 semitonos, en la que cada octava se divide en 12 partes que son iguales en una escala logarítmica; como referencia se utiliza la nota La de 440 Hz (Web 1). Según este temperamento, la relación entre las frecuencias de dos semitonos contiguos es de $\sqrt[12]{2}$.

Para saber qué longitudes deben tener nuestros tubos sonoros, simplemente hay que usar la relación:

$$L_n = \frac{v}{4 f_n} = \frac{343}{4 \sqrt[12]{2^n} f_0} \quad [\text{m}]. \quad (2)$$

En el numerador de la ecuación (2) aparece la velocidad de propagación del sonido en el medio, v , que se ha tomado como 343 m/s para el aire en condiciones normales. En esta ecuación, n es el número de semitonos por encima (n positivo) o por debajo (n negativo) de la frecuencia $f_0=440$ Hz (nota La4) y la longitud está expresada en metros. Por ejemplo, si queremos producir la nota Do4, cuya frecuencia es de 261,63 Hz ($n=-9$), la longitud del tubo deberá ser de 32,77 cm. En la tabla 1 se incluyen, a modo de referencia rápida, las frecuencias de algunas notas, así como el número n de semitonos respecto a la referencia y la longitud de tubo correspondiente, obtenida mediante la ecuación (2).

Determinación de la velocidad del sonido en aire

Hoy en día hay numerosos programas de ordenador que permiten grabar sonidos a través del micrófono, representar su amplitud en función del tiempo y realizar su análisis espectral

¹ Si se introducen las palabras clave “palm pipes” en cualquier buscador de la web, aparecerán numerosos enlaces, en los que también se encuentran temas musicales adecuados para una orquesta de tubos.

Movimiento de las moléculas del aire (longitudinal)

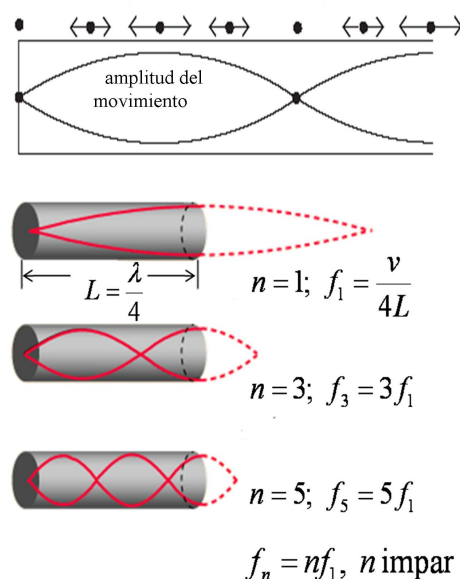


Figura 1. Ondas estacionarias generadas en un tubo abierto por el extremo derecho y cerrado por el izquierdo. La línea roja representa la amplitud del movimiento de las moléculas de aire en cada punto del tubo (como se aprecia en la primera figura, ese movimiento es longitudinal).

(mediante una Transformada de Fourier), que proporciona las frecuencias presentes en el sonido. En este trabajo hemos utilizado el programa Audacity (Web 2), de descarga gratuita. En la figura 2a se muestra un ejemplo de grabación realizada con este programa. La imagen muestra la amplitud de la onda sonora generada al golpear el tubo de longitud $L=163$ mm en función del tiempo, que tiene una forma sinusoidal. La zona iluminada corresponde a 20 períodos, comprendidos en un intervalo temporal de $0,0389 \pm 0,0001$ s. El periodo será por tanto de $1,947 \pm 0,005$ ms, y la frecuencia fundamental correspondiente ($513,61 \pm 0,13$ Hz) se acerca a la de la nota Do5 (véase la tabla 1). En este intervalo puede observarse cómo decae la amplitud del sonido debido al amortiguamiento de las vibraciones de la columna de aire.

Nota	n	Frecuencia, f (Hz)	L_n (m)	Nota	n	Frecuencia, f (Hz)	L_n (m)
Do4	-9	261,63	0,328	Sol4	-2	392,00	0,219
Do#4	-8	277,18	0,309	Sol#4	-1	415,30	0,206
Re4	-7	293,66	0,292	La4	0	440,00	0,195
Re#4	-6	311,13	0,276	La#4	1	466,16	0,184
Mi4	-5	329,63	0,260	Si4	2	493,88	0,174
Fa4	-4	349,23	0,245	Do5	3	523,25	0,164
Fa#4	-3	369,99	0,232	Do#5	4	554,37	0,154

Tabla 1. Relación entre notas, frecuencia y longitud de tubo para la escala temperada con 12 semitonos.

Puesto que se cumple la relación (1) entre la frecuencia y la longitud de onda, la velocidad de propagación del sonido en el aire será $v = f\lambda = 513,61 \text{ Hz} \times 0,163 \text{ m} \times 4 = 344,87 \pm 0,06 \text{ m/s}$. El error de la velocidad se ha calculado teniendo en cuenta los errores del tiempo medido y de la longitud del tubo (1 mm). Este valor coincide prácticamente con el valor de referencia (343 m/s en aire seco a 20 °C). Este resultado, además de sencillo, ilustra fácilmente la formación de armónicos en un tubo y la relación entre las diversas magnitudes que caracterizan la onda sonora.

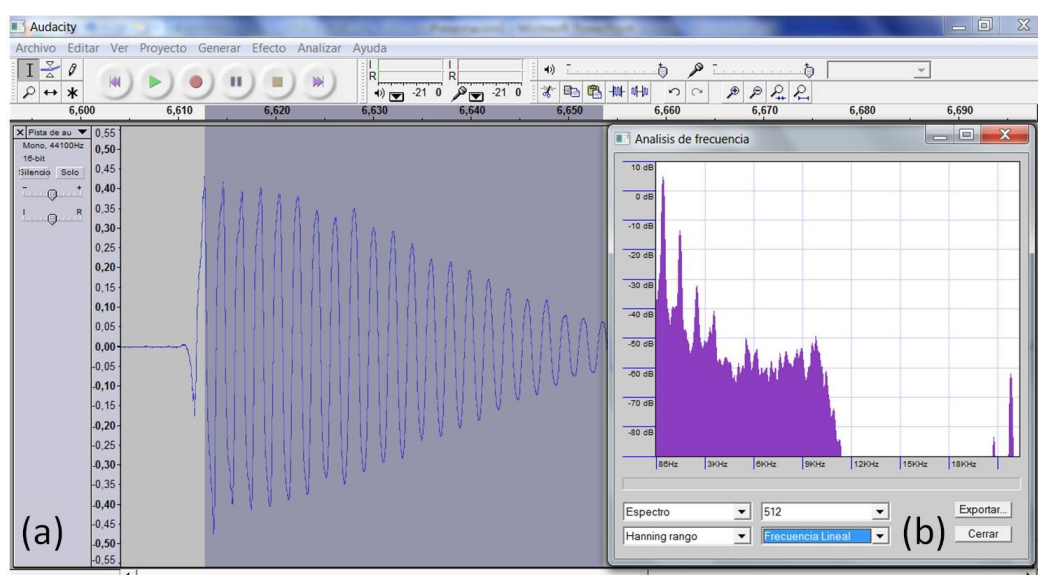


Figura 2. (a) Amplitud del sonido generado al golpear el tubo de longitud $L=163$ mm, en función del tiempo. La selección corresponde a 20 períodos que abarcan un intervalo de tiempo de 0,0389 s. (b) Transformada de Fourier de la onda de la figura (a). Las flechas marcan la posición de los armónicos. Aparecen picos en las frecuencias $f_1=521$ Hz, $f_3=1539$ Hz, $f_5=2548$ Hz y $f_7=3589$ Hz.

Puede obtenerse un análisis más detallado de las características de la onda realizando un análisis de Fourier de la zona iluminada (figura 2b). Se observa claramente que sólo están presentes los armónicos impares, tal y como se espera para un tubo ideal cerrado por un extremo y abierto por el otro. Este comportamiento se pierde en parte a medida que el tubo se va haciendo más largo. En estas condiciones, la longitud de onda es cada vez mayor, mientras que el diámetro del tubo permanece pequeño. Para longitudes de onda mucho mayores que el diámetro del tubo, los armónicos superiores se alejan de la idealidad. En estas condiciones en la serie armónica aparecen también los armónicos pares, aunque con menor intensidad. En los tubos estudiados en este trabajo este fenómeno se aprecia para longitudes mayores de 294 mm (Re4). A partir de las frecuencias obtenidas para la serie armónica se deduce un valor de la velocidad de propagación del sonido en el tubo de $333,17 \pm 0,05$ m/s.

El análisis es más completo si se representa la frecuencia fundamental frente a la inversa de la longitud de onda para tubos de diferentes longitudes. Se verifica que la relación es lineal, y en base a la ecuación (1), la pendiente de la recta que pasa por los puntos experimentales representa la velocidad del sonido en el aire (figura 3).

Para finalizar este apartado quisiéramos comentar que, en realidad, la onda estacionaria que se forma dentro del tubo se comporta como si éste fuera ligeramente más largo, de manera que el vientre no se encuentra exactamente en el extremo abierto, sino un poco más lejos. Si llamamos D_{int} al diámetro interno del tubo, la longitud efectiva del mismo para la onda sonora será aproximadamente $L + 0,3 \times D_{\text{int}}$ (Harkleroad 2006, Johnston 2009). Sin embargo, con los tubos utilizados en nuestro experimento no ha sido posible comprobar este efecto. Hemos observado que las variaciones de frecuencia producidas por cambios en la temperatura del aire y la forma de ejecutar los golpes en el tubo son mayores que el efecto debido a esta corrección.

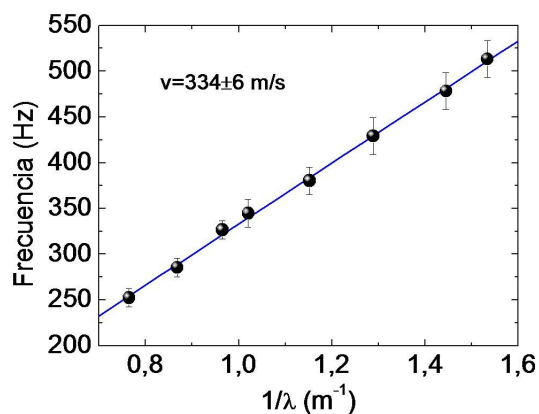


Figura 3. Frecuencia del armónico fundamental en función de la inversa de la longitud de onda ($4L$). La pendiente de la recta corresponde a la velocidad de propagación del sonido en el aire.

Orquesta de tubos sonoros

Los tubos sonoros permiten interpretar piezas musicales en la clase, como una forma de integrar la Física y la Música. Dependiendo de las piezas que se desee interpretar con los tubos sonoros, se pueden fabricar tubos de 8 longitudes diferentes (correspondientes a las notas de la escala, de Do4 a Do5, con $n = -9, -7, -5, -4, -2, 0, 2, 3$, véase la tabla 1) o también se pueden confeccionar tubos con las longitudes correspondientes a los semitonos (un total de 13 tubos de longitudes diferentes, con n recorriendo todos los enteros desde -9 hasta 3). Si el número de personas que va a participar en la interpretación es elevado convendrá, además, hacer varios tubos de cada una de las longitudes. En su fabricación, nosotras hemos utilizado una sierra de calar, lija y tubos de PVC de 2,5 cm de diámetro exterior (2,2 cm de diámetro interior).

La pieza que se quiera interpretar puede estar escrita en lenguaje musical (notas en un pentagrama) o bien utilizando el mismo código de colores indicado en los tubos (véase la

figura 4a). La partitura se puede proyectar sobre una pantalla mientras se dirige su ejecución señalando con un puntero las notas que han de tocarse en cada momento. A cada persona que participe en la ejecución se le dará un sólo tubo que deberá golpear repetidamente en su extremo con la palma de la mano (figura 4b).



Figura 4. (a) Partitura con código de colores. (b) Ejecución de dicha partitura con tubos sonoros por parte de un grupo de niños participantes en *El Pati de la Ciència*, celebrado en 2005 en la Universitat d'Alacant (Ferrer y Cros 2005). Para distinguir los tubos de diferente longitud (y por lo tanto frecuencia fundamental), se pueden pegar cintas de diferentes colores o indicar la nota de cada uno de ellos. El código de colores tiene la ventaja de permitir la participación de personas sin conocimientos musicales.

Referencias

- Ferrer C., Cros A. (2005) ¡Física, maestro! La física de la música, en Abril I., García Molina R. *El Pati de la Ciència*, Universitat d'Alacant. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/15064>
- Ferrer-Roca C., Cros A. (2005) ¡Física, maestro! Un recorrido experimental por la Física de la música. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* 46, 18-33.
- García-Molina R., Piñol N., Abellán J. (2009) Se ve, se siente... el sonido está presente. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* 64, 72-78.
- Harkleroad L. (2006) *The Math behind the Music*. New York. Cambridge University Press.
- Johnston I. (2009) *Measured Tones. The Interplay of Physics and Music*. Londres. CRC Press.
- Michlavzina S. J. (2003) Physics Nocturn, *Second International GIREP Seminar* (1-6 septiembre). Udine, Italia.
- Web 1 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/music/tempercn.html#c1>. Desde aquí se accede a los valores en frecuencia de la escala bien temperada o 12-E7E. Otra tabulación se encuentra en <http://www.phy.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>, sólo que ésta utiliza una velocidad del sonido de 345 m/s.
- Web 2 Audacity es un editor y grabador de audio libre que puede descargarse del siguiente enlace: <http://audacity.sourceforge.net/?lang=es>